雪面反力計測によるスノーボードにおける カービングターンの運動解析に関する研究[†]

廣 瀬 圭* 千 葉 遙* 近 藤 亜希子*
齊 藤 亜由子* 伏 見 知何子** 土 岐 仁*

A Study on Motion Analysis of Carving Turns in Snowboarding by Measurement of Reaction Force from Snow Surface[†]

Kiyoshi HIROSE*, Haruka CHIBA*, Akiko KONDO*
Ayuko SAITO*, Chikako FUSHIMI** and Hitoshi DOKI*

Abstract

This paper deals with the motion analysis of carving turns in snowboarding by the measurement of reaction force from snow surface. The measurement system of reaction force from snow surface is installed between the snowboard and bindings, and the system can measure the 6-axis force components from snow surface (force and moment) using the outputs of several 3-axis compact force sensors. We conducted the measurement experiment of carving turns performed by a high skill snowboarder. The results showed how the reaction force from snow surface varied from sec to sec. Furthermore, we compared the results of this study and the previous study and we calculated the moments of torsion and deflection of snowboard for denoting the important factors in carving turns. The results showed the differences of reaction forces according to the difference of the snowboarder's skill and the deflection moment of the snowboard for the unweighting and the adjustment of turn. The results can be used to clarify the mechanism of snowboard turns and to evaluate the snowboarder's skill.

Key words : Snowboarding, Carving Turn, Force Sensor, Reaction Force from Snow Surface

1. 緒 言

スノーボードは、若者を中心に人気であり、1枚の板を用いて滑走するスノースポーツである。スノーボーダーは、両足を板にビンディングを用いて横向きになるように固定した状態で雪面を滑走していることから、ターンを行うための操作力等はスキーとは大きく異なる。こ

れまでに、スノーボード・ターンの解析に関する研究として、スノーボード操作の測定に関する研究¹⁾やスノーボード板の特性に関する研究²⁾、スノーボードロボットの開発³⁾やスノーボード・ターンのシミュレーション⁴⁾に関する研究等が行われているが、スノーボード・ターンのメカニズムを明らかにするためには、実際にターンを行いながら滑走するスノーボーダー

[†] 原稿受付 2015年12月24日 原稿受諾 2016年7月5日

* 秋田大学 〒010-8502 秋田県秋田市手形学園町1-1

** 有限会社Area51s 〒173-0022 東京都板橋区仲町15-17

* Akita University, 1-1, Gakuenmachi, Tegata, Akita, Akita, Japan (010-8502)

** Area51s Limited Company, 15-17, Nakacho, Itabashi-ku, Tokyo, Japan (173-0022)

Fig.1 The measurement system of reaction force from snow surface

Fig.2 Snowboarder installed the measurement systems and definition of the coordinate system

がスノーボード板に伝えている操作力またはその反作用力によって得られる雪面反力を計測・解析する必要がある。しかし、スノーボーダーは雪面を高速で滑走していることから、実際のスノーボード・ターンにおける計測は難しい。実際に雪面を滑走するスノーボーダーの運動計測、解析に関する研究として、GPSレシーバ、慣性センサ、インソールシステムを用いたスノーボーダーの運動解析に関する研究⁵⁾やビデオカメラとモバイルフォースプレートを用いた片足の関節トルク計測に関する研究⁶⁾が行われている。これまでに筆者らも、実滑走における雪面反力を計測するために、6軸力センサを用いた雪面反力計測システムを開発し、磁気式位置センサや慣性センサ・地磁気を用いた

スノーボーダーの運動計測を併用することによる、スノーボード・ターンの運動力学解析^{7)~9)}を行ってきた。しかし、モバイルフォースプレートや6軸力センサは若干の大きさ・重量を有しており、スノーボーダーに対して拘束感を与えてしまうため、スノーボーダーが雪面反力計測においても本来の運動ができるようにシステムの小型化・軽量化を行う必要があった。そこで、複数の小型3軸力センサを用いた片足、両足の雪面反力を計測可能なシステムを開発し、実滑走におけるスノーボーダーによる雪面反力を示した¹⁰⁾¹¹⁾。しかし、スノーボード・ターンのメカニズムを明らかにするためには、実滑走の雪面反力情報からターンを行うために必要な要素について詳細に解析する必要がある。先行研究

の結果だけでは計測情報が不十分である。そこで、本研究ではスキルの異なるスノーボーダーによる雪面反力計測・解析とターンを行うための要素に着目した運動解析を行い、スノーボード・ターンのメカニズムを解明するために必要な運動情報を定量的に示す。

2. 雪面反力計測システム

本研究において使用する雪面反力計測システムをFig.1に示し、両足に雪面反力計測システムを装着しているスノーボーダーと座標系の定義をFig.2に示す。本システムには、プレートの間に複数の小型3軸力センサ（テック技販社, USL06-H6-2kN）を搭載することができ、片足に対して3個以上の力センサを搭載することにより、6分力（3軸の力と3軸のモーメント）を計測することができる。力センサの計測情報から力、モーメントを得るための計算式を式(1)、(2)に示す。

$$f = \sum_{i=1}^m F_i \quad (1)$$

$$f = \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \\ f_z \end{bmatrix}, F_i = \begin{bmatrix} F_{ix} \\ F_{iy} \\ F_{iz} \end{bmatrix}$$

$$n = \sum_{i=1}^m ({}^0p_i \times F_i) \quad (2)$$

$$n = \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix}, {}^0p_i = \begin{bmatrix} {}^0p_{ix} \\ {}^0p_{iy} \\ {}^0p_{iz} \end{bmatrix}, F_i = \begin{bmatrix} F_{ix} \\ F_{iy} \\ F_{iz} \end{bmatrix}$$

ここで、 f は力、 n はモーメントであり、 0p_i は原点から力センサまでの位置ベクトル、 F_i は力センサの出力である。 m は力センサの個数であり、力センサを多く使用することにより計測レンジを拡大することができる。スノーボードに作用する雪面反力（力、モーメント）の座標系定義をFig.3に示す。

本研究ではターンのメカニズムについて解析するために、両足にかかる雪面反力からスノーボード板にかかるたわみ（X軸）とひねり（Y

(a) Force components of right and left foot

(b) Moment components of right and left foot

Fig.3 Definition of coordinate system of reaction force from snow surface on snowboard

軸、Z軸）に関するモーメントを算出する。たわみ、ひねりに関するモーメントの計算式を式(3)に示す。

$$\begin{aligned} N &= N_{left} - N_{right} = n_{left} + f_{left} \times d_{left} \\ &\quad - n_{right} - f_{right} \times d_{right} \\ N &= \begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_z \end{bmatrix}, N_{left} = \begin{bmatrix} N_{left(x)} \\ N_{left(y)} \\ N_{left(z)} \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (3)$$

$$N_{right} = \begin{bmatrix} N_{right(x)} \\ N_{right(y)} \\ N_{right(z)} \end{bmatrix}, d_{left} = \begin{bmatrix} 0 \\ d \\ 0 \end{bmatrix}, d_{right} = \begin{bmatrix} 0 \\ -d \\ 0 \end{bmatrix}$$

ここで、 N はたわみ、ひねりに関するモーメントの合力、 N_{left} 、 N_{right} はたわみ、ひねりに関する左足、右足にかかるモーメント、 f_{right} 、 n_{right} は右足に、 f_{left} 、 n_{left} は左足にかかる雪面反力（力、モーメント）、 d_{right} 、 d_{left} はスノーボードの中心から雪面反力計測システムの原点までの位置ベクトルであり、 d はスノーボードの中心か

ら雪面反力計測システムの原点までの距離である。たわみ、ひねりに関するモーメントの座標系定義をFig.4に示す。雪面反力計測システムに搭載している力センサからの計測信号は、専用アンプ（テック技販社，DPA-03A）によって増幅された後にマイクロコントローラ（Cypress社，PSoc5LP）によってA/D変換（分解能：16bit）され，F-RAM（Cypress社，FM25W256）に一時的に記録される。計測実験終了後に自動的にマイクロSDカードに保存される。なお，本システムはGPSレシーバや慣性センサを併用して用いることが可能であり，本研究ではGPSレシーバ（Arduino社，LS20031）を用いて滑走軌跡を計測している。

3. 実 験

両足に雪面反力計測システムを，頭部にGPSレシーバを装着したスノーボーダーによる実際の雪面における計測実験を実施した。雪面反力計測システムには，片足に対して4個，両足にて合計8個の力センサを搭載しており，サンプリング周波数は100Hzとした。また，GPSレシーバのサンプリング周波数は10Hzとし，計測時間は30秒とした。スノーボーダーは，身長154cm，体重50kg，スノーボード歴19年，スタイルはレギュラースタンスのプロスノーボーダーであり，トリノオリンピックハーフパイプ日本代表選手である。スノーボーダーは，数秒静止した後に，フロントサイドターン，バックサイドターンを繰り返し行った。さらに，先行研究において得られた雪面反力計測・解析結果との比較を行っており，先行研究におけるスノーボーダーは身長178cm，体重66kg，スノーボード歴3年であり，スタイルはレギュラースタンスである。

4. 実 験 結 果

実験によって得られた計測情報より算出した力・モーメントの結果をFig.5～Fig.8に示す。なお，本結果はGPSレシーバから得られた位置情報を用いてFig.9に示すターン切替期を推定

Fig.4 Definition of the coordinate system in the moments about torsion and deflection of snowboard

し，1ターン分（バックサイドターン→フロントサイドターン）を抽出した結果を示している。なお，ターン切替期は，滑走軌跡が直線となる部分を抽出することによって推定している。滑走軌跡と推定したターン切替期をFig.10に示す。また，本結果におけるターン切替間の滑走距離は，バックサイドターン：34.8m，フロントサイドターン：30.9mである。

力の結果に着目すると，左足においてはフロントサイドターン中のZ軸力成分 $F_{left(z)}$ が

Fig.5 Results for the forces component in left foot

Fig.8 Results for the moments component in right foot

Fig.6 Results for the forces component in right foot

Fig.7 Results for the moments component in left foot

Fig.9 Definition of one turn and switchover

バックサイドターン中よりも大きい値を示しているが、右足においてはバックサイドターン中のZ軸力成分 $F_{right(z)}$ がフロントサイドターン中よりも大きい結果となっており、バックサイドターンを行うために、若干後方に荷重を変化させていた。

モーメントの結果に着目すると、両足ともにY軸モーメント $N_{left(y)}$ 、 $N_{right(y)}$ が大きく変化しており、その後にモーメントを保持していた。本結果は、ターンを行うために発生させたエッジング量を保持するためにモーメントを発生させていたことを示している。また、右足のY軸モーメント $N_{right(y)}$ においてターン切替期付近にモーメントが逆方向に大きく変化している。本結果は、ターンを行う前に一時的に反対方向にモーメントを発生させることにより力を溜め、その

Fig.10 Gliding trajectory and estimated switchover

反動を用いることにより、ターンし易くしていることを示している。

5. 解析結果

異なるスキルのスノーボーダーによる雪面反力の違いからターンのメカニズムについて解析を行うために、先行研究において得られた結果との比較、解析を行った。雪面反力の比較結果をFig.10～Fig.13に示す。なお、スノーボーダーによってターンを行う時間が異なるため、バックサイドターンを0～50%、フロントサイドターンを50%～100%として正規化した結果を示している。

力の結果 (Fig.11, Fig.12) に着目すると、先行研究における左足のZ軸力成分 $F_{left(z)}$ は本研究の結果よりも小さく、右足のZ軸成分 $F_{right(z)}$ は大きくなっており、全体的に後ろ足荷重になっていることを示している。また、バックサイドターン中において両足のZ軸力成分 $F_{left(z)}$ 、 $F_{right(z)}$ の差はより大きいため、より後ろ足荷重が顕著に現れている。

モーメントの結果 (Fig.13, Fig.14) に着目すると、Y軸モーメント成分 $N_{left(y)}$ 、 $N_{right(y)}$ が最も大きく変化しており、両結果ともに同様の傾向を示した。一方、Z軸モーメント成分に着目すると、先行研究の結果において、左足にZ軸

Fig.11 Results for the forces component of left foot in this study and the previous study

Fig.12 Results for the forces component of right foot in this study and the previous study

Fig.13 Results for the moments component of left foot in this study and the previous study

Fig.15 Results for the moments component about torsion and deflection of left foot in this study

Fig.14 Results for the moments component of right foot in this study and the previous study

Fig.16 Results for the moments component about torsion and deflection of right foot in the previous study

モーメント $N_{left(z)}$ が変化しており、スノーボードを回転させるように力を発生させていた。X軸モーメント成分に着目すると、本研究の結果においては、右足においてX軸モーメント $N_{right(x)}$ が変化しており、スノーボードをたわませるように力を発生させていた。

以上より、スキルの違いによる雪面反力の違いについてまとめると、前足荷重と後足荷重、スノーボードを回転させる力、スノーボードをたわませるための力が顕著に表れていた。

雪面を滑走している状態においては、常に空気抵抗や雪面からの摩擦を受けていることが

ら、滑走方向に対して前傾姿勢を保持する必要がある。本研究における結果は、先行研究の結果と比べて前足荷重となっており、滑走方向に対して前傾姿勢を保持している。

スノーボード・ターンにおいて、スノーボード板の横ずれが少ないカービングターンと横ずれを行うことによってターンを行うドリフトターンが挙げられるが、ドリフトターンにおいては、横ずれを発生させるためにスノーボード板を回転させるための力が必要となる。先行研究の結果では、ターンを行うためにスノーボード板に回転させるための力を発生させているこ

Table 1 Mean value of Force and moment in snowboard turns

	In this study (Expert)				In the previous study (Beginner)			
	Backside turn		Frontside turn		Backside turn		Frontside turn	
	Left foot	Right foot	Left foot	Right foot	Left foot	Right foot	Left foot	Right foot
Difference values of Z-axis force of left and right feet in turns $F_{left(z)} - F_{right(z)}$ (N)	109.6		-90.8		-229.7		-48.4	
Y-axis moment in turns n_y (N·m)	-45.3	-26.8	33.7	46.2	-34.5	-74.6	43.9	36.8
Z-axis moment in turns n_z (N·m)	-6.0	-7.5	-8.2	1.2	23.0	-4.53	-19.7	0.6
X-axis moment in turns n_x (N·m)	7.8	-20.7	10.6	-20.5	-1.9	4.0	1.6	8.3
Y-axis moment (torsion) in turns N_y (N·m)	44.4				59.8			
Z-axis moment (deflection) in turns N_z (N·m)	48.9				62.9			

とから、ドリフトターンに近いターンを行っていることを示しており、カービングターンを行うためのスキルの違いが表れている。

カービングターンにおいては、スノーボードのサイドカーブやたわみを用いてターンを行っていることから、スノーボードをたわませる力が重要である。そこで、式(3)を用いてスノーボード全体にかかるモーメントの合力(たわみ、ひねり)を算出した。

本研究、先行研究において得られた計測情報より算出したモーメントの合力の結果をFig.15, Fig.16にそれぞれ示す。Y軸モーメント、Z軸モーメントの結果に着目すると、本研究の計測実験より得られたモーメントの変化は、先行研究の計測実験より得られたモーメントよりも小さい。本結果は、カービングターンを行うためには、Y軸、Z軸におけるひねりに関するモーメント N_y 、 N_z の発生を抑える必要があることを示している。X軸モーメント N_x に着目すると、本研究の計測実験より得られたモーメントは、ターン切替期付近において一時的に変化した後、ターン中は比較的一定に発生している。また、バックサイドターンとフロントサイドターンとでは、モーメントの大きさが異なり、バックサイドターン時の

モーメントはフロントサイドターン時のモーメントよりも大きい。一方、先行研究の計測実験より得られたX軸モーメントには、ターン切替期における変化はなく、ターン中の変化も不規則である。これらの結果において、ターン切替期付近におけるモーメントの変化は、ターンを切り替えるための重要な技術である抜重を示しており、抜重を行うことによりターンの切り替えを効率よく行っていることを示している。また、バックサイドターンとフロントサイドターンにおけるモーメントの違いは、ターンの状況に応じてスノーボードのたわみを変化させていることを示しており、本研究において得られた結果より、スノーボード板にたわみを発生させることによりターンを行っていることを示している。

さらに、本研究、先行研究において行った実験によって得られた各6ターン分におけるターン中の雪面反力、たわみ・ひねりに関するモーメントについて算出し、バックサイドターン、フロントサイドターン中における力のZ軸成分の左右差($F_{left(z)} - F_{right(z)}$)の平均値、モーメントのY軸成分 n_y 、X軸成分 n_x 、Z軸成分 n_z の平均値、1ターン中におけるたわみ・ひねりに関するモーメントのY軸 N_y 、Z軸成分 N_z の平均値

をまとめた結果を **Table 1** に示す。ここで平均値は、バックサイドターン、フロントサイドターンにおける 1 秒間の値を抽出し平均した結果を用いた。

本結果より、先行研究におけるスノーボーダーは常に後ろ足荷重であり、バックサイドターン中はさらにその傾向が大きいこと、両スノーボーダーともにターンを行うためにモーメントの Y 軸成分を発生させていること、先行研究におけるスノーボーダーにおける左足モーメントの Z 軸成分が大きく、回転させるようにモーメントが発生していること、本研究におけるスノーボーダーはスノーボードをたわませるために X 軸モーメントを使用していること、本研究におけるスノーボーダーは先行研究におけるスノーボーダーよりもたわみ・ひねりに関するモーメントの Y 軸成分、Z 軸成分が小さいことから、同様の傾向が得られていることを示した。

また、本研究におけるスノーボーダー（上級者）の解析によって得られた運動の特徴について確認を行った結果、ターンを行うためにこれらの操作を行っていることを確認した。

以上より、先行研究における結果との比較、モーメントの合力を用いた解析を行うことにより、スキルの違いによるカービングターンを行うための雪面反力を示すことができた。

6. 結 言

本研究では、複数の小型力センサを搭載したスノーボード用雪面反力計測システムを用いて上級者スノーボーダーによるカービングターンの計測実験・解析を行った。さらに、先行研究において得られた結果との比較やスノーボードにかかるモーメントの合力成分を用いたさらなる解析を行うことにより、スキルの異なるスノーボーダーにおける雪面反力の違いやカービングターンを行うために必要な要素（滑走方向に対する前傾姿勢の保持、抜重、スノーボード板のたわみ等）を定量的に示すことができた。本研究によって得られた結果より、本システム

を用いることによってスノーボーダーがターンを行った際の雪面反力を計測できることから、本研究における解析において得られた特徴と比較することによって、スノーボーダーのスキル評価を行うことが可能であることを示すことができた。また、スノーボードにおけるカービングターンを適切に行うための指導要領の構築や他の情報（滑走軌跡・速度等）を併用した解析を行うことにより、スノーボード板の開発への利用やスノーボード・ターンのメカニズム解明が期待できる。今後の課題として、より多くの被験者や異なる実験条件（コース、雪面状況）による計測実験・解析を行い、スノーボード・ターンの特徴についてのさらなる明確化が必要である。

参 考 文 献

- 1) 坂田敏行；スノーボード操作の測定, 日本スキー学会誌, Vol.10, No.1, pp.45-52, 2000.
- 2) 坂田敏行, 他；スノーボードと滑走平面領域に関する実験的研究, スポーツ産業学研究, Vol.11, No.1, pp.53-61, 2001.
- 3) 坂田敏行, 他；スノーボード・ターンのシミュレーションに関する研究, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.65, No.639, pp.4431-4437, 1999.
- 4) 清水史郎, 長谷川健二；スノーボードロボットの開発～足関節の底屈・背屈モデル～, スキー研究, Vol.1, No.1, pp.9-13, 2003.
- 5) A. Krüger, J. Edelmann-Nusser；Biomechanical analysis in freestyle snowboarding: application of a full-body inertial measurement system and a bilateral insole measurement system, Sports Technology, Vol.2, No.1-2, pp. 17-23, 2009.
- 6) Klous, M., et al.; Three-dimensional lower extremity joint loading in a carved ski and snowboard turn: A pilot study, Vol.45, No.16, pp.1303-1309, 2011.
- 7) 土岐 仁, 他；スノーボード・ターンの運動解析に関する研究, 日本機械学会論文集 C 編, Vol.72, No.713, pp.190-196, 2006.
- 8) Hirose, K., et al.；Dynamic motion analysis of snowboard turns by the measurement of

- motion and reaction force from snow surface, The Engineering of Sport 9, pp.754-759, 2012.
- 9) 廣瀬 圭, 他; 実滑走計測によるスノーボード・ターンの運動力学解析に関する研究, 日本機械学会論文集C編, Vol.79, No.800, pp.897-907, 2013.
- 10) Kondo, A., et al.; An attempt for measuring snowboarding performance using compact force sensors, The Engineering of Sport 10, pp.86-91, 2014.
- 11) 近藤亜希子, 他; 小型力センサを用いたスノーボード用雪面反力計測システムの開発に関する研究, スキー研究, Vol.11, No.1, pp.51-57, 2014.